◀油气田开发工程▶

超高温尾管胶塞力学行为及本构模型研究*

彭晓刚[1,2,3,4] 刘忠飞[1,2,3,4] 董亮亮[5] 刘金磊[6] 叶素桃[1,2,3,4] 史耀伟[6]

（1. 中国石油塔里木油田分公司 2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心
3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心 4. 新疆超深油气重点实验室
5. 西南石油大学机电工程学院 6. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司新疆分公司）

彭晓刚，刘忠飞，董亮亮，等. 超高温尾管胶塞力学行为及本构模型研究[J]. 石油机械，2026，54（9）：111-116.

Peng Xiaogang，Liu Zhongfei，Dong Liangliang，et al. Mechanical behaviors and constitutive models of ultra-high temperature liner wiper plugs[J]. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：111-116.

摘要：深层、超深层是我国油气资源重要的接替领域，然而井下超高温工况对尾管固井胶塞密封性能提出了更高要求。为研究超高温工况下尾管胶塞橡胶材料的力学特性，设计并开展了常温、高温、老化工况下HK7596B氟橡胶与AFLAS氟橡胶单轴拉伸试验；使用最小二乘法对应力-应变试验数据进行拟合，建立了HK7596B氟橡胶3种工况下超弹性本构模型，分析了试验数据与拟合数据的误差。研究结果表明：常温、老化工况下2种橡胶拉伸强度与断裂伸长率未发生明显变化，而高温工况下，2种橡胶拉伸强度与断裂伸长率发生明显下降；HK7596B橡胶常温、老化、高温下的拉伸强度与断裂伸长率均高于AFLAS橡胶，材料力学性能更优，更适合作为尾管胶塞的制备材料；2阶Mooney-Rivlin模型拟合效果与试验数据符合度最高，更适合表征HK7596B氟橡胶作为固井胶塞材料的力学性能；随着环境工况由常温→高温→老化状态转变，胶塞von Mises应力呈现先增大后稳定的非线性演化特征，其接触界面密封性能随热氧老化进程呈渐进强化趋势。研究结果可为胶塞选材及设计提供理论指导。

关键词：深层；尾管固井；胶塞；力学特性；本构模型；氟橡胶；断裂伸长率

中图分类号：TE925 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202506074

Mechanical Behaviors and Constitutive Models of Ultra-High Temperature Liner Wiper Plugs

Peng Xiaogang[1,2,3,4] Liu Zhongfei[1,2,3,4] Dong Liangliang[5] Liu Jinlei[6] Ye Sutao[1,2,3,4] Shi Yaowei[6]

（1. *PetroChina Tarim Oilfield Company*；2. *CNPC R & D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development*；3. *Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development*，*Xinjiang Uygur Autonomous Region*；4. *Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas*；5. *School of Mechanical Engineering*，*Southwest Petroleum University*；6. *CCDC Xinjiang Branch Company*）

Abstract：Deep and ultra-deep hydrocarbons are important substitute resources in China. However，the ultra-high downhole temperature raises stringent requirements on the sealing performance of wiper plugs in liner cementing. To understand the mechanical properties of rubber materials for liner wiper plugs under ultra-high temperature，uniaxial tensile tests were performed on fluororubbers HK7596B and AFLAS under normal-temperature，high-temperature and aging conditions. The stress-strain test data were fitted by the least square method，hyper-

* 基金项目：国家自然科学基金项目“自激湍流作用下稠油油藏水平井机械控水开采机理研究”（52204050）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

elastic constitutive models of HK7596B under the three working conditions were established, and the errors between the test and fitting data were analyzed. The results show that the tensile strength and elongation at break of the two fluororubbers present no considerable change under normal-temperature and aging conditions, but significant reductions under high-temperature condition. HK7596B exhibits higher tensile strength and elongation at break under normal-temperature, aging and high-temperature conditions than AFLAS, indicating better mechanical properties and greater suitability as a material for liner wiper plugs. The second-order Mooney-Rivlin model yields the fitting results in the best agreement with the test data, so it is more suitable for characterizing the mechanical properties of HK7596B as the material for wiper plugs. As the environmental condition changes from normal temperature to high temperature and then to the aging state, the von Mises stress of the plug evolves in a nonlinear manner from increasing and then stabilizing, and the plug's contact sealing performance tends to enhance gradually with the progress of thermal-oxidative aging. The research findings provide theoretical guidance for the material selection and design of wiper plugs.

Keywords: deep strata; liner cementing; wiper plug; mechanical property; constitutive model; fluororubber; elongation at break

0　引　言

随着浅层油气藏资源的不断开发和枯竭，深层、超深层已成为重要的油气战略领地[1-4]。目前，已有一批超 9 000 m 的特深井在逐渐开发。然而随着钻井深度增加，井下温度越来越高，这对尾管固井胶塞材料密封性能提出了更高的要求[5-8]。为增强材料性能，马雨[9]通过丁腈橡胶硫化配方改进设计出新型固井胶塞，并开展室内试验验证胶塞的密封性能。郑琦铭[10]采用氟橡胶替代丁腈橡胶，并与传统胶塞进行固井质量对比，证明其在深井、水平井中的有益效果。周文军等[11]将氢化丁腈橡胶硫化处理，并差异化设计皮碗硬度，有效解决胶塞撕裂损伤问题。景卜卜[12]引入复合纤维布表面强化技术以应对超深井胶塞磨损难题。Szadkowski 等[13]通过在丁腈橡胶添加短纤维将橡胶撕裂强度提升，从而提高了胶塞井下抗撕裂强度。Leblanc 等[14]、Trogus 等[15]分别采用氟橡胶、氢化丁腈橡胶，通过结构优化设计实现了胶塞耐磨性突破。当前胶塞材料体系向氟橡胶、氢化丁腈橡胶及纤维增强复合材料延伸，胶塞材料耐磨性、耐撕裂性有了显著提升。然而，针对超高温工况（如深井、特深井环境）下尾管胶塞橡胶材料的力学行为特性，当前认知仍显不足，其在极端高温条件下的性能评价尚缺乏系统的理论模型支撑与试验数据指导。

为填补深井、超深井尾管胶塞高温环境下材料力学特性研究空白，笔者开展了尾管固井胶塞 240 ℃超高温橡胶材料力学行为及本构模型研究，以期为胶塞选材及设计提供理论依据。

1　橡胶超高温力学行为特性研究

井下用橡胶密封件材料有丁腈橡胶、氢化丁腈橡胶、氟橡胶。深层超深层尾管胶塞设计温度高达 240 ℃，对胶塞材料耐高温性能提出了极高的要求。而丁腈橡胶、氢化丁腈橡胶因热氧老化引发的交联网络降解问题，难以满足 200 ℃以上极端使用工况需求。氟橡胶基于其 C-F 键高键能特性赋予的耐热优势，在高温和极端环境下性能突出，其耐温范围通常在-40~250℃，能够在严苛环境中长期使用而不发生性能退化。根据单体组成、分子结构及功能化改性差异，氟橡胶可分为以下几类：标准氟橡胶（FKM）、全氟醚橡胶（FFKM）、四氟乙烯-丙烯共聚物（FEPM）、氟硅橡胶（FVMQ）和特种氟橡胶。根据井下工况对橡胶耐热性与使用寿命要求，FEPM（如 AFLAS）与 FVMQ（如 HK7596B）在满足长期使用温度的条件下，兼具较高的经济性和长的使用寿命。这里选取 HK7596B 与 AFLAS 2 种常用氟橡胶材料，开展橡胶单轴拉伸性能试验，探究不同工况下橡胶力学行为特性。

1.1　拉伸性能试验

参考 GB/T 528—2009，检测条件设置如下：加载速度 500 mm/min；样品为 1 型哑铃状试样，标距 25 mm；试样检测工况分别为常温（温度为

21.6℃、相对湿度为55%）、240 ℃高温环境下存储2 h、240 ℃高温环境下老化72 h，然后取出，在1 min内完成检测。

主要检测设备如表1所示。每种工况下检测20个样品，取20个样品的平均值为材料拉伸强度和断裂伸长率的检测结果。

表1　主要检测设备

Table 1　Main testing equipment

序号	设备名称	设备型号
1	电子材料万能试验机	UTM5105-GD
2	数显指示表	22M1628
3	送风定温干燥箱	ADL150
4	DIN磨损试验机	GT-7012-D

1.2　试验结果分析

图1为单轴拉伸的应力-应变曲线。由图1可知：3种工况下，在低应变区，AFLAS橡胶与HK7596B橡胶应力变化基本一致；而在高应变区，HK7596B橡胶应力明显小于AFLAS橡胶。

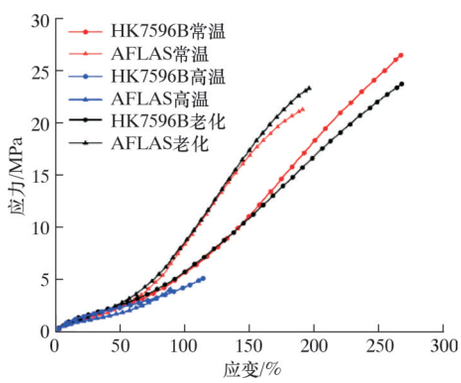


图1　单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 1　Uniaxial tensile stress-strain curve

橡胶材料拉伸强度和断裂伸长率的试验结果如表2所示。

表2　材料拉伸强度和断裂伸长率试验结果

Table 2　Test results of material tensile strength and elongation at break

样品名称	拉伸强度/MPa			断裂伸长率/%		
	常温	高温	老化	常温	高温	老化
HK7596B	28.08	6.34	24.69	275.86	123.15	276.96
AFLAS	21.18	3.75	22.56	188.44	78.22	195.76

由表2可知：常温、老化工况下2种橡胶拉伸强度与断裂伸长率未发生明显变化；而高温工况下，2种橡胶拉伸强度与断裂伸长率发生明显下降。HK7596B橡胶常温、老化、高温下的拉伸强度与断裂伸长率均高于AFLAS橡胶，材料力学性能更优。因此，笔者选择HK7596B橡胶作为尾管胶塞的制备材料。

2　橡胶超高温拉伸力学行为本构表征

2.1　橡胶超弹性变形控制方程

根据连续介质力学理论，可将橡胶视为一种超弹性不可压缩材料，橡胶的相对力学性能可用应变能密度函数来表征。基于唯象模型的多项式形式，各向同性橡胶材料的应变能密度可以分解为2部分：应变能偏量和体积应变能。

$$W = f\left(\overline{I}_1 - 3, \overline{I}_2 - 3\right) + g(J - 1) \tag{1}$$

式中：W为应变能密度函数；f为应变能偏量函数；g为体积应变能函数；J为橡胶变形后与变形前的体积比；$\overline{I}_1 = J^{-\frac{2}{3}} I_1$、$\overline{I}_2 = J^{-\frac{4}{3}} I_2$，$I_1$、$I_2$分别为变形张量的2个不变量。

令$g = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{D_i}(J-1)^{2i}$，将式（1）经泰勒展开可以转变为：

$$W = \sum_{n=1}^{N}\sum_{i=0}^{n} C_{i,\,n-i}\left(\overline{I}_1 - 3\right)^{i}\left(\overline{I}_2 - 3\right)^{n-i} + \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{D_i}(J-1)^{2i} \tag{2}$$

式中：n为选择的多项式的阶数，$1 \leqslant n \leqslant N$；$D_i$为材料常数；$C_{ij}$为材料参数；$i$为求和指数。

D_i取决于橡胶材料的压缩情况，D_i近似于0，代表材料不可压缩。不管N取多大，初始的剪切模量G_0和初始的体积模量K_0都只取决于n=1时多项式的系数，关系如下：

$$G_0 = 2\left(C_{10} + C_{01}\right) \tag{3}$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \tag{4}$$

2.2　橡胶本构参数拟合

选择Mooney-Rivlin模型、2阶Mooney-Rivlin模型、Ogden模型、Yeoh模型4种常用超弹性本构模型，运用最小二乘法，将HK7596B氟橡胶应力-应变数据拟合，得到常温、高温、老化状态下橡胶本构模型拟合曲线。基于拟合数据与试验数据误差分析，评估不同超弹性本构模型的拟合效果。图2为不同工况下本构模型拟合曲线与误差分析曲线。

由图2可知：常温下2阶Mooney-Rivlin本构模型和Ogden本构模型在整个变形区间拟合效果均比较理想，拟合应力误差小于5%；老化工况下，2阶Mooney-Rivlin本构模型拟合效果比较理想，Ogden本构模型在小变形区间拟合效果较差，拟合应力误差大于5%；高温工况下，2阶Mooney-Rivlin本构模型和Ogden本构模型拟合效果均较优，但在小变形区间与大变形区间，2阶Mooney-Rivlin

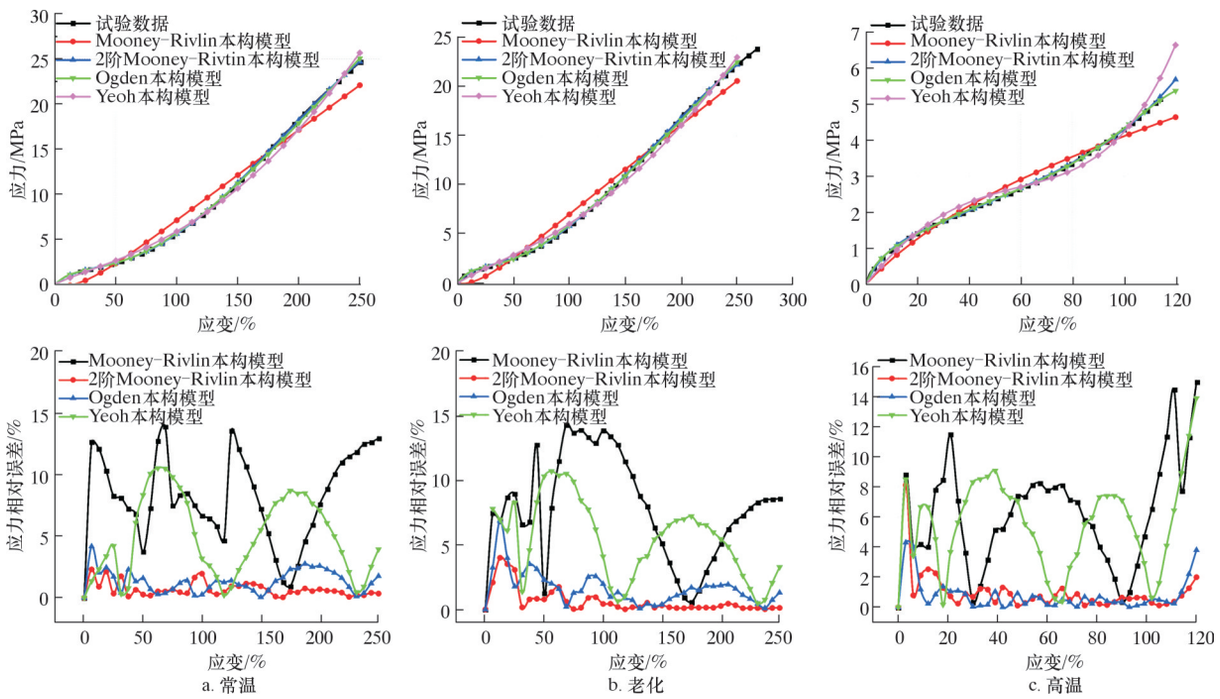


图 2　不同工况下本构模型拟合曲线与误差分析曲线

Fig. 2　Fitting curves and error analysis curves of constitutive models under different working conditions

本构模型拟合效果更理想；Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型在整个变形区间拟合效果均较差，在变形区间段拟合应力误差大于 5%。因此，2 阶 Mooney-Rivlin 本构模型更适合表征 HK7596B 氟橡胶作为固井胶塞材料的力学性能。3 种工况下，HK7596B 氟橡胶本构模型拟合结果如表 3 所示。

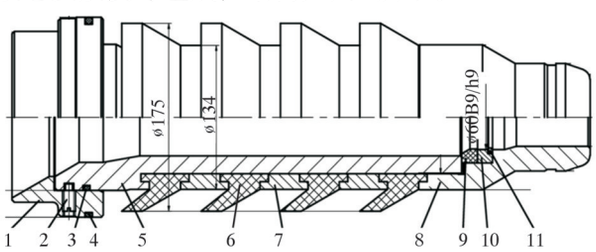
表 3　HK7596B 氟橡胶 2 阶 Mooney-Rivlin 本构模型拟合参数

Table 3　Fitting parameters of the second-order Mooney-Rivlin constitutive model for HK7596B

参数	常温	高温	老化
C_{10}	−3.357 4	−9.309 0	−5.471 4
C_{01}	5.582 3	12.070 2	8.005 9
C_{20}	−0.472 1	1.822 8	−0.310 4
C_{11}	2.597 8	−6.640 7	1.650 2
C_{02}	−1.350 3	9.792 8	0.502 6
D_1	0	0	0
D_2	0	0	0

2.3　尾管固井胶塞有限元仿真

尾管固井胶塞是保证尾管固井作业质量的核心部件，在尾管固井过程中对不同类型流体（如钻井液与水泥浆）起到物理隔离作用，避免流体混窜导致水泥浆性能劣化。尾管胶塞的胶皮与套管内壁的动态贴合运动，完成对套管内壁的机械清洁，确保水泥浆在环空区域的有效充填；最终保障水泥环的密封完整性与井筒结构稳定性。尾管胶塞总成主要由剪切环、剪切钉、O 形密封圈、胶芯及胶皮等组成，结构如图 3 所示。



1—剪切环；2—剪切钉；3、4—O 形密封圈；5—胶芯；6—胶皮；7—隔环；8—碰压头；9—方形密封圈；10—自锁垫环；11—自锁环。

图 3　尾管胶塞总成结构示意图

Fig. 3　Schematic structure of the liner wiper plug assembly

为评价尾管固井胶塞材料的适用性，基于弹塑性理论建立了胶塞密封性能有限元评价模型，如图 4 所示。尾管胶塞由 4 组相同尺寸的胶皮组成，第 1 组胶皮首先承受上端钻井液压力；第 1 组胶皮失效后，后续胶皮继续作用。因此，只需对第 1 组胶皮建立模型。模型采用 C3D8R 六面体网格，以获得更高的计算精度；设置套管为固定约束，胶皮与胶芯为绑定约束，轴向上的耦合位移为 300 mm；胶皮与套管内壁摩擦因数为 0. 3。

密封面最小接触应力是尾管胶塞密封压力评价指标，只有当最小接触应力大于介质压力时才不会发生泄漏。von Mises 应力是胶塞材料发生疲劳失效的判断标准，von Mises 应力越大，胶塞发生疲劳破裂的可能性越大。计算得到尾管固井胶塞常温、高温、老化状态下 von Mises 应力及密封压力，如图 5 所示。

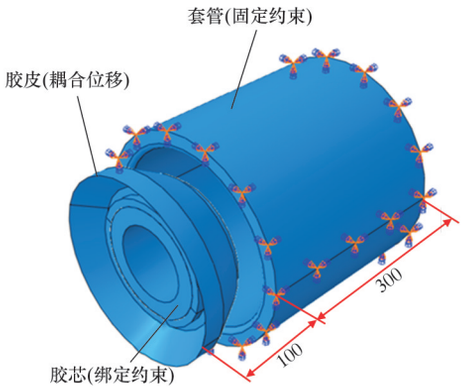


图 4　尾管胶塞密封性能有限元分析模型

Fig. 4　Finite element model for sealing performance of liner wiper plug

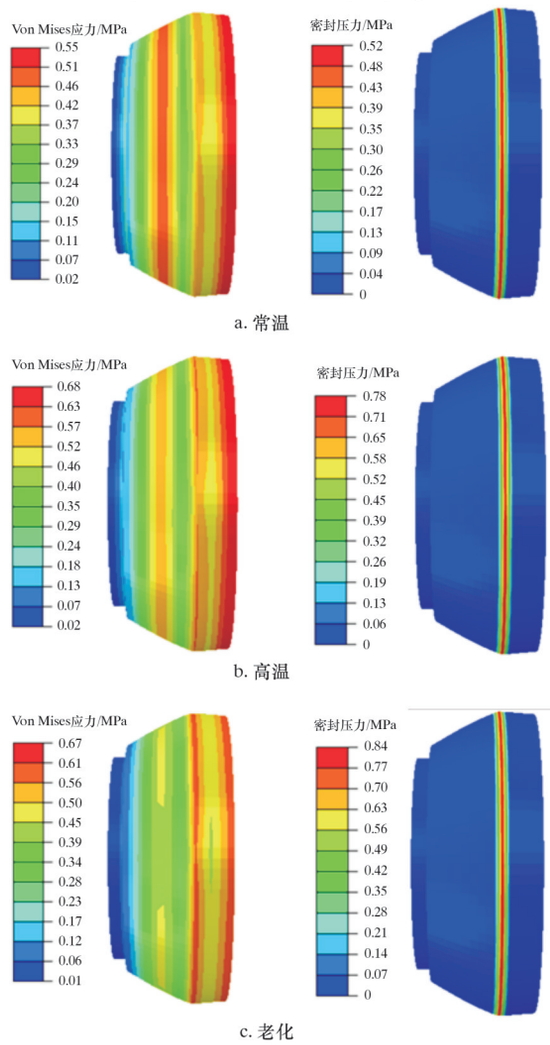


图 5　不同工况下胶塞 von Mises 应力及密封压力

Fig. 5　Von Mises stress and sealing pressure of wiper plug under different working conditions

尾管胶塞 von Mises 应力及密封压力变化规律如图 6 所示。由图 6 可知：随着环境工况由常温→高温→老化状态转变，胶塞 von Mises 应力呈现先增大后稳定的非线性演化特征，胶塞密封性能呈逐步增强趋势；在高温及老化工况下，尾管胶塞更易发生疲劳破裂。然而，该状态下胶塞所能承担的密封压力也相应提高，表现出更好的承压能力。

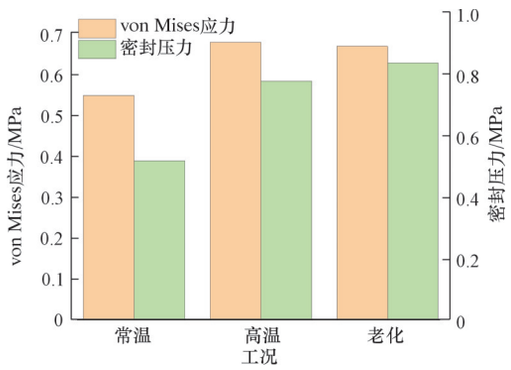


图 6　不同工况下 von Mises 应力及密封压力变化曲线

Fig. 6　Variations of von Mises stress and sealing pressure under different working conditions

图 7 为不同工况下胶塞密封面接触应力分布曲线。由图 7 可知，随着橡胶由常温→高温→老化状态转变，密封面接触应力波动越来越小，尾管胶塞最小接触应力增大。这是因为橡胶分子链热运动增强，材料变软，弹性模量下降，橡胶的弹性变形变大，橡胶更容易贴合密封面，填充微观缺陷，从而增强了密封性能。

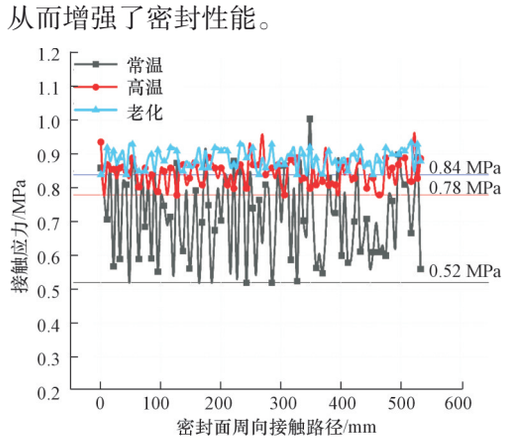


图 7　不同工况下密封面接触应力变化曲线

Fig. 7　Variations of contact stress on sealing surface under different working conditions

尾管固井胶塞在井下工作时间短，故老化时间短。因此在胶塞结构满足设计要求时，工作过程中不会因为高温老化现象发生密封失效，该材料体系可满足深井超深井尾管固井极端工况下的密封要求。

3　结　论

（1）设计并开展了常温、高温、老化工况下 HK7596B 氟橡胶与 AFLAS 氟橡胶单轴拉伸试验。试验结果表明：常温、老化工况下 2 种橡胶拉伸强度与断裂伸长率未发生明显变化，而高温工况下，

2 种橡胶拉伸强度与断裂伸长率发生明显下降；HK7596B 橡胶常温、老化、高温下的拉伸强度与断裂伸长率均高于 AFLAS 橡胶，材料力学性能更好，更适合作为尾管胶塞的制备材料。

（2）使用最小二乘法对应力-应变试验数据进行拟合，得到 HK7596B 氟橡胶在 3 种工况下超弹性本构模型，并通过拟合曲线与试验数据对比，得到 2 阶 Mooney-Rivlin 模型拟合效果与试验数据符合度最高，更适合表征 HK7596B 氟橡胶作为固井胶塞材料的力学性能。

（3）建立了胶塞-套管动态密封性能评价模型，发现随着环境工况由常温→高温→老化状态转变，胶塞 von Mises 应力呈现先增大后稳定的非线性演化特征，其接触界面密封性能随热氧老化进程呈渐进强化趋势，表明该材料体系可满足深井超深井尾管固井极端工况下的密封要求。

参　考　文　献

[1] 靳建洲，魏风奇，艾正青，等. 超深特深油气井固井关键技术进展[J]. 钻采工艺，2024，47（2）：104-112.
Jin Jianzhou，Wei Fengqi，Ai Zhengqing，et al. Key technologies for cementing of deep and ultra-deep oil and gas wells [J]. Drilling & Production Technology，2024，47（2）：104-112.

[2] 汪海阁，黄洪春，毕文欣，等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业，2021，41（8）：163-177.
Wang Haige，Huang Hongchun，Bi Wenxin，et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies：progress and prospect [J]. Natural Gas Industry，2021，41（8）：163-177.

[3] 李阳，薛兆杰，程喆，等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探，2020，25（1）：45-57.
Li Yang，Xue Zhaojie，Cheng Zhe，et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China [J]. China Petroleum Exploration，2020，25（1）：45-57.

[4] 刘岩生，张佳伟，黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报，2024，45（1）：312-324.
Liu Yansheng，Zhang Jiawei，Huang Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China [J]. Acta Petrolei Sinica，2024，45（1）：312-324.

[5] 薛宪波，华泽君，祝效华，等. 无限级固井滑套密封胶筒参数敏感性分析及优化[J]. 润滑与密封，2025，50（1）：129-137.
Xue Xianbo，Hua Zejun，Zhu Xiaohua，et al. Sensitivity analysis and optimization of infinite cementing sliding sleeve sealing rubber cylinder parameters [J]. Lubrication Engineering，2025，50（1）：129-137.

[6] Dong Liangliang，Li Kun，Li Bin，et al. Study in deep shale gas well to prevent shoulder protruding packer with high pressure sealing [J]. Engineering Failure Analysis，2020，118（1）：104871.

[7] Liu Yang，Qian Liqin，Zou Jiayan，et al. Study on failure mechanism and sealing performance optimization of compression packer [J]. Engineering Failure Analysis，2022，136：106176.

[8] 王龙. 高温高压完井封隔器结构优化[J]. 石油机械，2023，51（6）：112-118.
Wang Long. Structure optimization for high-temperature high-pressure well completion [J]. China Petroleum Machinery，2023，51（6）：112-118.

[9] 马雨. 新型固井胶塞的研制[J]. 世界橡胶工业，2012，39（9）：17-20.
Ma Yu. The development of new rubber plug[J]. World Rubber Industry，2012，39（9）：17-20.

[10] 郑琦铭. 深井固井胶塞改进及应用[J]. 化学工程与装备，2016（10）：89-91.
Zheng Qiming. Improvements and applications of deep well cement plugs[J]. Fujian Chemical Industry，2016（10）：89-91.

[11] 周文军，高云文，吴学升，等. 变径自锁复合固井胶塞的研制与应用[J]. 石油机械，2013，41（1）：17-19.
Zhou Wenjun，Gao Yunwen，Wu Xuesheng，et al. Development and application of the taper self-locking compound cementing plug[J]. China Petroleum Machinery，2013，41（1）：17-19.

[12] 景卜卜. 基于复合结构的随行振动胶塞耐磨性研究[D]. 西安：西安科技大学，2021.
Jing Bubu. Study on wear resistance of traveling vibration rubber plug based on composite structure [D]. Xi'an：Xi'an University of Science and Technology，2021.

[13] Szadkowski B，Marzec A，Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites [J]. Composite Interfaces，2019，26（8）：729-750.

[14] Leblanc T. Going the distance cement wiper plug technology[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition，Hague，Netherland，2017：SPE-184712-MS.

[15] Trogus M，Farley D，Gaspard G. Studies of cement wiper plugs suggest new deepwater standards[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition，London，England，UK，2015：SPE-173066-MS.

第一作者简介：彭晓刚，高级工程师，生于 1971 年，1993 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业，现从事钻井研究与管理工作。地址：（841000）新疆库尔勒市。

通信作者：董亮亮，副教授。email：dll181@163.com。

修改回稿日期：2026-03-17

（本文编辑　王刚庆）